



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Epätyypilliset orogeeniset kultaesiintymät

Tiia Piittinen

GEOTIETEET

Kandidaatintutkielma

Joulukuu 2020

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	1
1. Johdanto.....	2
2. Kultamalmien luokittelu.....	2
3. Orogeeninen kulta	4
3.1. Tektoninen ympäristö	4
3.2. Rakenne.....	6
3.3. Hydrotermiset fluidit.....	7
3.4. Muuttuminen ja isäntäkivet.....	8
4. Epätyypillinen orogeeninen kulta	9
5. Esimerkkitapaukset	10
5.1. Rompas-Rajapalot Au-Co-U	10
5.1.1. Rompas	11
5.1.2. Rajapalot	12
5.2. Kuusamon Au-Co-Cu esiintymät	13
5.3. Levijärvi-Loukinen	16
5.4. Saattopora.....	17
LÄHDELUETTELO.....	20

Tiivistelmä

Kultamalmien luokitteluperusteina on useita eri tapoja, joista geneettisen tyyppin mukaan luokittelu on yleisin. Orogeeniset kultaesiintymät ovat yksi kultaesiintymätyyppi ja yleisin kultaesiintymätyyppi metamorfisilla kallioperäalueilla. Ne muodostuvat tektonisilla törmäysvyöhykkeillä (orogenia). Orogeenisten kultaesiintymien pääpiirteisiin kuuluu: rakenteellinen kontrolli, lähes neutraali ja alhaisen suolapitoisuuden omaavat hydrotermiset fluidit ja fluidien vaikutuksesta vyöhykkeellisesti muuttuneet malmia ympäröivät kivilajit. Epätyypilliset orogeeniset kultaesiintymät eroavat niiden sisältämien epätyypillisen metalliassosiaation vuoksi (esim. Ag-Cu-Co-Ni-Sb). Nämä perusmetallit eivät kulkeudu alhaisen suolapitoisuuden fluideissa, mikä erottaa ne tyypillisestä orogeenisestä esiintymästä. Tässä tutkielmassa tarkoitus on tehdä kirjallisuuskatsaus epätyypillisiin orogeenisiin kultaesiintymiin esimerkein Pohjois-Suomesta.

Rompas-Rajapalot Au-Co-U on Ylitornion kunnan alueella oleva esiintymä, johon kuuluu useampia mineralisaatioita. Rompaksen alueella Au-U esiintymät sijaitsevat dolomiitti-kalkkisirikaattijuonissa. Rajapalojen alueella esiintyy Au-Co esiintymiä vaihtelevin piirtein, aina uraanirikkaista, ”Rompas” tyyppin esiintymistä, pirotteeseen kulta-koboltti esiintymään. Kuusamon alueella esiintyy useampia Au-Co-U esiintymiä, joista yksi suurimmista on Juomasuon Au-Co esiintymä. Juomasuon esiintymä sijaitsee Kuusamon liuskevyöhykkeessä ja serisiitti-kvartsiitti muodostumassa. Esiintymä voidaan jakaa kahteen mineraalisaatioon. Co-mineralisaation ajatellaan muodostuneen ennen Au-Co mineralisaatiota. Levijärvi-Loukisen esiintymä on monimetallinen juonikultaesiintymä Kittilän kunnan alueella Keski-Lapissa. Alue voidaan jakaa useampaan pienempään esiintymään. Alueen mineralisaatiot noudattavat sirkan hiertovyöhykkeen kulkua. Esiintymä koostuu kvartsi-karbonaattisulfidijuonista ja niiden verkostoista. Saattoporan Au-Cu on myös Kittilän kunnan alueella oleva esiintymä, jossa on ollut kaivostoimintaa vuosina 1988–95. Esiintymä sijaitsee Levijärvi-Loukisen tapaan Keski-Lapin vihreäkivivyöhykkeellä ja on suuntautunut Sirkka hiertovyöhykkeen kulun suuntaisesti. Esiintymän juonet ovat vahvasti albiittisoituneita. Tutkimusten perusteella Saattoporan esiintymän fluidien alkuperänä olisi karbonaattirikas metasedimenttikivet.

1. Johdanto

Orogeeniset kultamalmit ovat yleisin kultamalmityyppi metamorfisilla kallioperäalueilla. Näiden perinteisten orogeenisten esiintymien lisäksi, etenkin Prekambrisilla kallioperäalueilla kultaesiintymissä on kullan lisäksi muita tärkeitä metalleja rikastuneena (kupari, koboltti, nikkeli jne.), jotka eivät kuulut perinteiseen orogeeniseen luokitteluun. (Robb 2005) Nämä esiintymät ovat nykypäivänä tärkeitä niiden sisältämien mahdollisten kriittisten metallien takia. Kriittiset metallit ovat tärkeitä tulevaisuuden vihreän teknologian mahdollistamisessa (Sarapää ym. 2015). Koboltti on yksi Euroopan komission 2020 listaamista kriittisistä raaka-aineista (European Commission 2020). Myös Geologian tutkimuskeskus (GTK) tutkii näiden kriittisten metallien esiintymispotentiaalia Suomessa (Sarapää ym. 2015). Tämän työn tarkoitus on tehdä kirjallisuuskatsaus orogeenisiin kultaesiintymiin. Erityistä huomiota kiinnitetään esiintymiin, jotka on luokiteltu ”epätyypillisiksi” orogeeniksi kultaesiintymiksi. Tämän kaltaisia esiintymiä käsitellään esimerkein Pohjois-Suomesta.

2. Kultamalmien luokittelu

Malmien luokittelussa käytetään erilaisia kriteerejä, joiden avulla pyritään selittämään samanlaisia piirteitä omaavien malmiesiintymien muodostumista (Robb 2005). Kultamalmien luokitteluun ja nimeämiseen on esitetty useita tapoja (esim. muodostumissyvyys, isäntäkivi, ikä, geneettinen alkuperä jne.; ks. Goldfarb ym. 2001; Ridley 2016). Malmien luokittelu ei kuitenkaan ole yksinkertaista, sillä usein esiintymät ovat hyvin monimutkaisia rakenteeltaan ja syntytaivoiltaan, ja yksittäisen esiintymän piirteet voivat poiketa toisistaan paljon. Kultaa myös esiintyy sivu- / päätuotteena hyvin monenlaisissa malmityypeissä ja tektonisissa ympäristöissä, ja kultarikkaita esiintymiä on muodostunut koko geologisen aikajakson aikana (Robert ym. 2007). Haasteellista luokittelusta tekee myös se, että esiintymissä voi esiintyä useiden eri tyyppien piirteitä.

Yksinkertainen tapa luokitella kultaesiintymät, on jakaa esiintymät kahteen luokkaan: 1) kulta- ja 2) kulta plus- esiintymät. (engl. gold-only/gold-plus). Tässä luokittelussa, kultaesiintymät luokitellaan sen mukaan, sisältääkö se muita taloudellisesti hyödynnettäviä metalleja, kuten kuparia, sinkkiä tai lyijyä. Tämä jaottelu on tunnistettu jo 80-luvun alussa (Kerrick & Hodder 1981). Tällä luokittelutavalla on tieteelliset perusteet, mitkä pohjautuvat kultaa kuljettaneiden hydrotermisten fluidien eroavaisuuksiin toisistaan (suolaisuus, ligandit ja hapetus-pelkistys (redox) olosuhteet; Phillips & Powell 2014). Myös kullan eri hapetusasteet (eritoten Au^+ ja Au^{3+}) voivat selittää tämän geokemiallisen erilaisuuden tyyppien välillä (Puddephatt 1978). Tämä luokittelu kultaesiintymistä

on kuitenkin äärimmäisen yksinkertainen ja ei esimerkiksi luo tarpeeksi kattavaa pohjaa malminetsinnälle.

Nykyään käytetyin luokittelu on geneettinen (Taulukko 1). Geneettiset tyypit tai ”mallit” on luotu, jotta voimme ymmärtää kuinka esiintymät muodostuvat. Mallit ovat tieteellisen tutkimuksen ja geologisen havainnoimisen tulosta. Geneettiset mallit kertovat, miksi tietynlaiset esiintymät esiintyvät tietynlaisilla tektonisilla alueilla ja minkälaisia prosesseja niihin liittyy. Ne myös kuvailevat malmion muotoa ja malmiin liittyvää mineralogian ja geokemiaa. (Ridley 2016)

Luonnossa esiintyvät esiintymät voivat poiketa runsaastikin luokittelun mallityypeistä. Myös mallit itsessään ovat epätäydellisiä, etenkin vähän tutkituista ja huonosti tunnetuista malmityypeistä. Mallien tarkoitus on kuitenkin opastaa malminetsinnässä, löydetyn esiintymän tutkimisessa, mineralogiassa ja hyödyntämisessä (Ridley 2016). Tässä työssä keskitytään orogeenisiin kultaesiintymiin, sekä niihin liittyviin, ei niin tyypillisiin metalliassosiaatioihin.

Taulukko 1. Kultaesiintymien tyypit geneettisen luokittelun mukaan (Muokattu Ranta 2018 jälkeen)

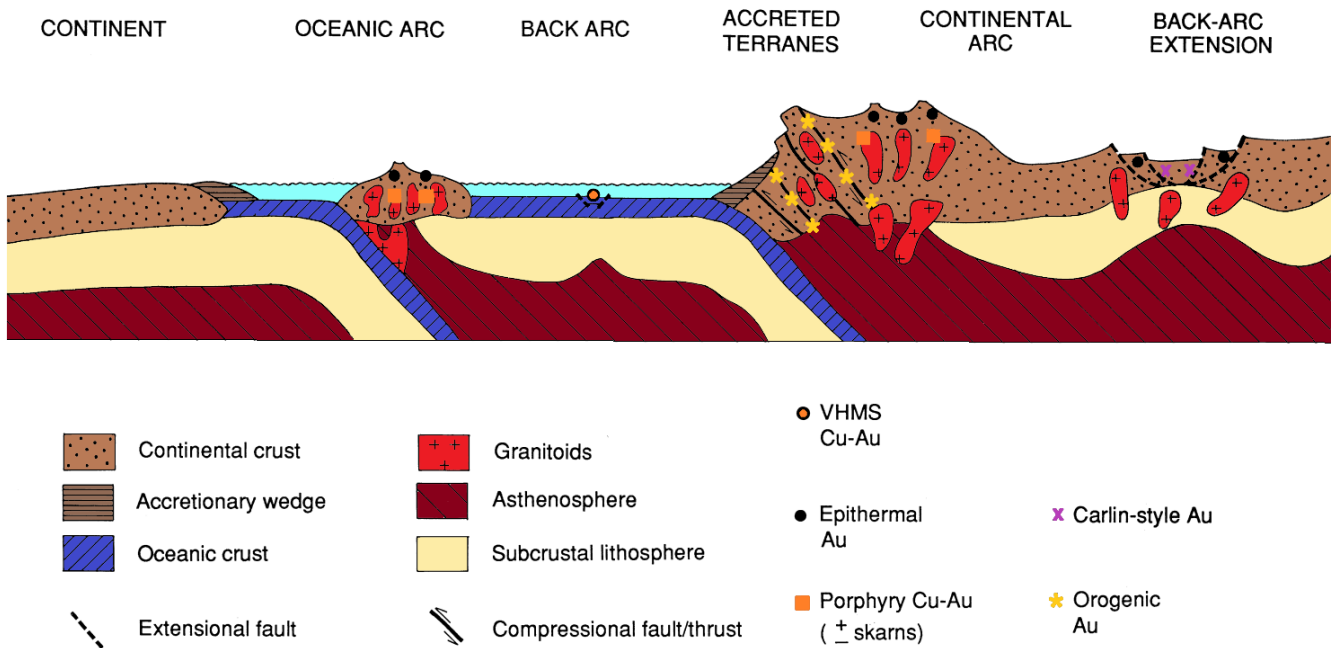
Geneettinen tyyppi	Metalliassosiaatio	Esimerkkiesiintymiä
Orogeeninen kulta	Au-As-Bi-Te-W-Sb	The Muruntau, Uzbekistan
Orogeeninen kulta epätyypillisen metalliassosiaation kanssa	Au-Cu-Co-Ag-Ni-Sb-U	Flatschach alue, Itävalta; Bidjovagge, Norja; Saattopora, Rompas-Rajapalot, Kuusamon alue, Levijärvi- Loukinen, Suomi
IOCG (iron-oxide-copper-gold)	Fe-Cu-Au	Olympic Dam, Australia
Karsimalmit	Au-As-Bi-Te-Cu	Junction Reefs. Australia
Porfyryinen kulta	Au-(Cu)-(Mo)	Grasberg kaivos, Indonesia
Epitermiset kultaesiintymät	Au-Ag (\pm Cu)	Kasuga ja Hishikari, Japani
kultarikas VMS (vulkanogeeninen massiivinen sulfidi)	Cu-Zn-Au	The LaRonde Penna, Kanada
Carlin	Au-As-Hg-Sb-Ti	Carlin trend, USA
Pelkistyneisiin intruusioihin liittyvät kultaesiintymät (RIRG)	Au-Bi-Te-W-Mo-As-Sb-Ag-Pb- Zn	Fort Knox, USA
Upamalmi (placer gold)	Au-(U)-(PGE)-(Cr)	Witwaterstrand, Etelä-Afrikka

3. Orogeeninen kulta

Orogeeniset kultaesiintymät edustavat yleisimpiä kultaesiintymiä metamorfisilla kallioperäalueilla (esim. Goldfarb ym. 2001). Ne ovat myös suurimpia kullan lähteitä ihmiskunnalle (Gaboury 2019). Luokittelun perustan loi Böhlke (1982), ja sitä täydensi Groves ym. (1998). Alunperin mesotermaalisiksi kultaesiintymiksi kutsutut orogeeniset kultaesiintymät huomattiin niiden vahva sidos orogeenisiin ympäristöihin (Groves ym. 1998). Orogenialla tarkoitetaan vuorijonon muodostukseen liittyviä prosesseja (Tieteentermipankki.fi), mikä onkin tyypillisin ja vahvin geneettinen linkki orogeenisten esiintymien välillä (Robb 2005). Orogeeniset kultaesiintymät tunnetaan myös suoni- tai juonikultana (engl. lode gold), kultarikkaina kvartsijuoniesiintyminä, tai vain kulta – esiintyminä (gold-only) (Ridley 2016). Kulta on pääasiallisesti ainoa ekonomisesti hyödynnettävissä oleva metalli. Orogeeniset kultaesiintymät edustavat hydrotermisiä esiintymiä, sillä niiden muodostumisprosessiin liittyvät hydrotermiset fluidit, jotka liuottavat, kuljettavat ja saostavat kulta, ja fluidit eivät ole peräisin magmaattisista lähteestä (vrt. Magmaattis-hydrotermiset malmit; Robb 2005).

3.1. Tektoninen ympäristö

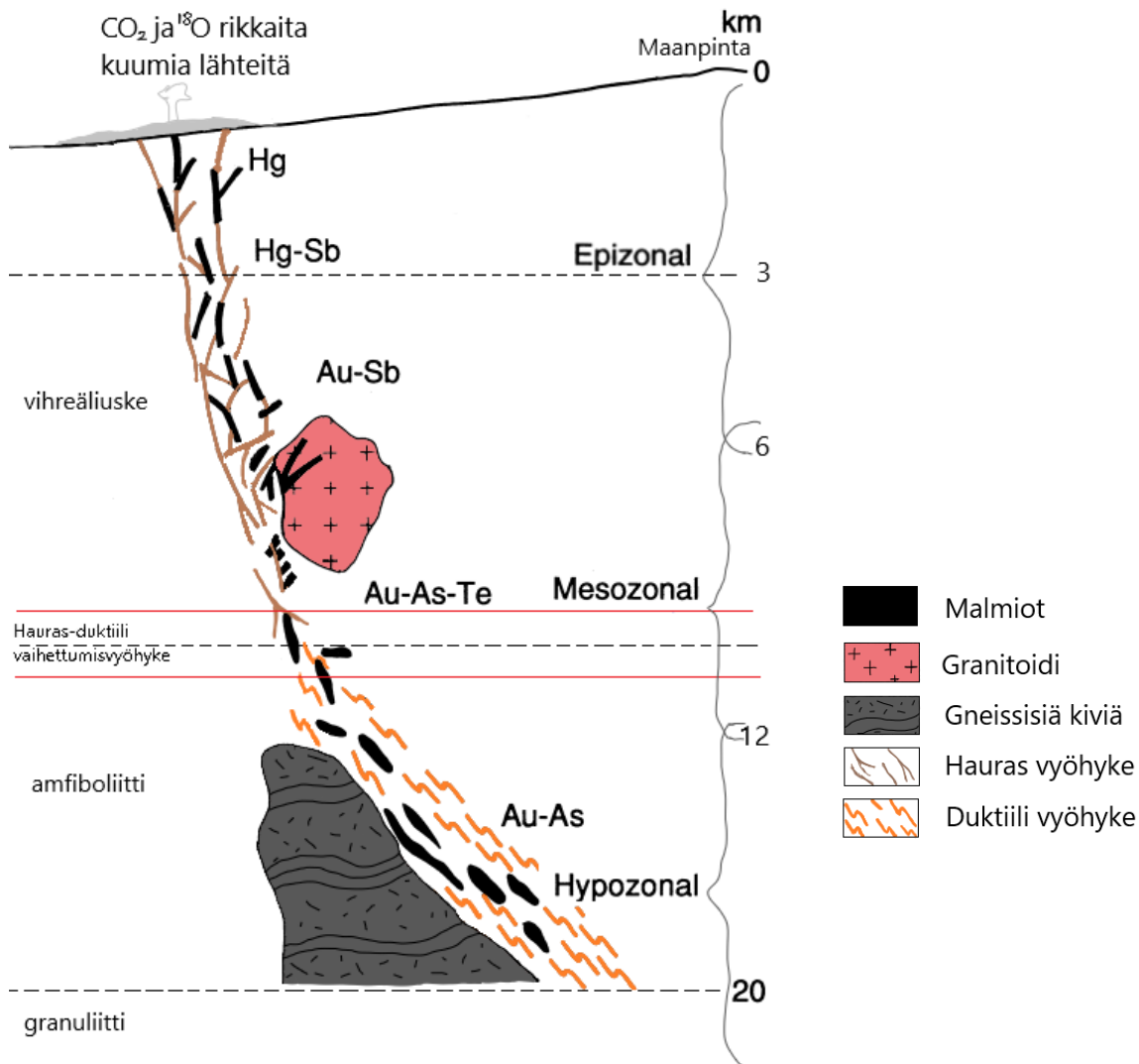
Orogeenisia kultaesiintymiä on muodostunut maapallolla yli 3 miljardin ajan, aina Arkeeisesta ajasta Fanerotsooiseen. Orogeenisten kultaesiintymien muodostuminen voidaan nähdä korreloivan supermannersykliden kanssa, näin ollen tapahtuen jaksoittain (Goldfarb ym. 2001).



Kuva 1. Kultamalmien muodostumiseen liittyvät tektoniset ympäristöt. Orogeniset kultaesiintymät merkattu keltaisella tähdellä. Kuva muokattu Groves ym. (1998) jälkeen.

Orogeniset esiintymät muodostuvat tektonisten laattojen törmäysvyöhykkeillä (Kuva 1). Niitä voi syntyä sekä merellisen ja mantereisen laatan törmäessä (subduktio) tai kahden mantereisen laatan törmäessä (poimutus). Esiintymien muodostumissyvyys vaihtelee aina muutamasta kilometristä 20 km maan kuoressa (Kuva 2). Orogeniset kultaesiintymät ovat tyypillisesti liitetty deformatuneisiin ja metamorfoituneisiin alueisiin, joissa esiintyy isoja kuoren laajuisia rakenteita, kuten siirroksia ja hiertovyöhykkeitä (Goldfarb ym. 2001). Tällaisista alueista hyvänä esimerkkinä toimii Arkeaiset graniitti-vihreäkivialueet (Robb 2005).

Esiintymät muodostuvat hyvin vaihtelevissa paine-lämpötilaolosuhteissa, vihreäliuskefasieksen olosuhteista aina granuliittifasieekseen. Laajasta P/T ympäristöstä johtuen, deformaatio voi olla haurasta (lähempänä pintaa) tai duktiilia (syvemmillä kuoressa) (Robb 2005; Kuva 2).



Kuva 2. Orogeenisen kullan muodostumisympäristöjä eri syvyydessä puristus- ja hirtovyöhykkeellä. Kuva muokattu Groves ym. (1998) ja Goldfarb & Groves (2015) jälkeen.

3.2. Rakenne

Orogeeniset kultaesiintymät ovat pääsääntöisesti vahvasti rakeenteellisesti kontrolloituja. Tämä tarkoittaa sitä, että esiintymän muoto ja sijainti liittyvät geometrisesti tai avaruudellisesti kalliooperän rakenteisiin, kuten esimerkiksi laajoihin siirroksiin (Groves ym. 2016). Orogeeniset esiintymät suosivat tunnetusti rakenteita ja yleensä muodostuvat joko suoraan niihin tai niiden välittömään läheisyyteen (Ridley 2016). Tästä esimerkkinä Abitibin vyöhykkeen kultaesiintymät Kanadassa (jyrkkäkulmainen ylityöntösiirros), Macraesin kaivos Uudessa-Seelannissa (loivakulmainen ylityöntösiirros), Yilgarnin alue Australiassa (hirtovyöhyke) (Gaboury 2019).

Useat esiintymät ovat muodoltaan suonimaisia. Ne voivat esiintyä yksittäisinä ja jatkuvina juonina tai useina pieninä, mutta tiheään esiintyvinä juonina. Näille on kuitenkin tyypillistä jyrkkä kaade,

sekä vertikaalinen jatkuvuus. Suuret esiintymät koostuvat näiden juonien verkostosta. Orogeenisille esiintymille on myös tyypillistä, että esiintymät ovat tasomaisia rakenteeltaan (Ridley 2016) ja niitä esiintyy siirrosvyöhykkeiden ja muiden suurien rakenteiden alueella useita. Tästä esimerkkinä Keski-Lapin vihreäkivivyöhykkeen alueella olevat orogeenisten kultamalmit, joita esiintyy koko alalla seuraten laajoja siirrosrakenteita (Patisson 2007).

3.3. Hydrotermiset fluidit

Orogeenisten kultalmien muodostamilla hydrotermisillä fluideilla on tyypilliset piirteensä ja koostumuksensa. Tyypillisenä pidettyjä olosuhteita ovat 250–400°C lämpötila ja 1–3 kbar paine, mutta myös korkeamman lämpötilan ja/tai paineen esiintymiä löytyy. Fluidien alkuperä on liitetty pääsääntöisesti metamorfisiin fluideihin, mutta osa fluideista voi olla magmaattista alkuperää (Yardley & Cleverley 2015; Gaboury 2019). Metamorfiset fluidit muodostuvat metamorfisten kivien ja mineraalien reaktioista, vapauttaen volatiileja aineita, kuten H_2O , CO_2 , H_2S . Näille on tyypillistä alhainen suolaisuus (2–10 p-%), lähes neutraali pH (noin 5.5 keskimääräisessä muodostumislämpötiloissa) ja H_2O - CO_2 rikas koostumus (Robb 2005). Fluidien CO_2 mooliosuus on yleisesti $X_{\text{CO}_2} = 0.10\text{--}0.25$, mikä on merkittävä määrä fluideissa. Fluideissa esiintyy vähäisenä määrinä metaania (CH_4), sekä typpeä (N_2) (Ridley 2016). Vaikka orogeenisten kultalmien muodostumiseen liittyvien fluidien lähteeksi on yleisesti hyväksytty olevan peräisin metamorfisista lähteistä, monimutkainen geologinen rakenne, vaihtelevat isäntäkivet, muodostuksessa laaja lämpötila - paine (P-T) ympäristö muun muassa, esiintymiin liittyvien fluidienkin koostumus ja alkuperä ovat jossain määrin vielä kiistelyn aiheena (Goldfarb & Groves 2015).

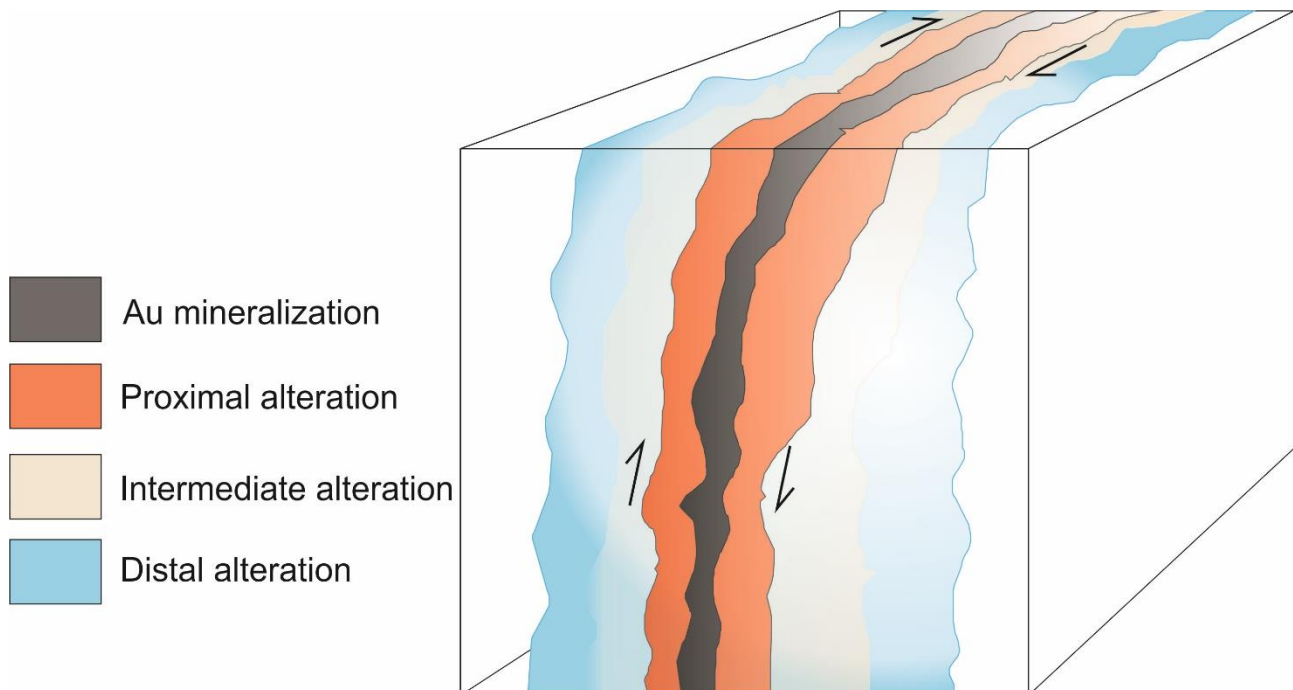
Kulta on luokiteltu kuuluvan ns. ”pehmeisiin metalleihin” yhdessä esimerkiksi hopean ja kuparin kanssa. Tämä luokittelu pohjautuu Pearsonin periaatteisiin ”kovista” ja ”pehmeistä” metalleista ja ligandeista (HSAB Hard and Soft Acids and Bases; Robb 2005). Yleisesti, pehmeät metallit muodostavat pehmeiden ligandien kanssa komplekseja ja kovat metallit kovien ligandien kanssa. Pehmeitä ligandeja ovat HS^- , I^- , CN^- , H_2S , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$. Kulta esiintyy yleensä hapetusluvulla Au^+ , mutta voi esiintyä myös hapetusluvulla Au^{3+} (Robb 2005). Tärkeänä kullan kuljettajana fluideissa on pidetty pelkistettyä rikkikompleksia (H_2S), joka kuuluu pehmeisiin ligandeihin (Groves ym. 1998). Tämä muodostaa kullan kanssa kompleksin AuHS alhaisen pH olosuhteissa tai/ja kompleksin $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ heikosti happamien tai heikosti emäksisten olosuhteiden vallitessa (Robb 2005). Fluidisulkeumatutkimusten perusteella on arvioitu H_2S pitoisuuksien vaihtelevan orogeenisten fluidien tapauksessa n. 0,01 ja 0,36 mol% välillä (Goldfarb & Groves 2015). CO_2 rikkaus fluideissa on todennäköisesti yksi kriittisistä tekijöistä fluidin lähes neutraalin pH:n muodostumiseen, mikä on tärkeää kullan korkeaan liukenemisasteeseen kulta-rikkikompleksina. (Phillips & Evans 2004;

Goldfarb & Groves 2015). Patten ym. (2020) tutkimuksen mukaan Arkeoisilla ja Paleoproterotsooisilla alueilla metavulkaaniset kivet voisivat olla yksi kullan lähde orogeenisissa kultaesiintymissä. Tehdyt tutkimukset La Grande ja Keski-Lapin alueilla tukevat kullan alkuperää metamorfoituneesta maankuoresta (Patten ym. 2020).

3.4. Muuttuminen ja isäntäkivet

Orogeeniset kultaesiintymät voivat muodostua vaihteleviin isäntäkiviin. Hydroterminen toiminta, joka muodostaa orogeeniset kultamalmit, vaikuttaa myös laajasti ympärillä olevaan isäntäkiveen (Ridley 2016). Arkeoisena aikana muodostuneilla esiintymillä yleisenä piirteenä mainittakoon se, että niiden isäntäkivenä toimii usein vihreäkivivyöhykkeisiin liittyvät kivilajit, kuten mafiset vulkaniitit, metasedimentit, raitaiset rautamuodostumat, sekä myös felsiset plutoniset kivet (Robb 2005).

Hydrotermiset esiintymät tyypillisesti muodostavat muodostuessaan ympärilleen vyöhykkeellisesti muuttuneen kehän tai vyöhykkeen. Orogeenisissa kultaesiintymissä vyöhykkeet voivat olla laajuudeltaan muutamista senttimetreistä kymmeniin metreihin ja on tyypillisesti muodostunut malmijuonien ja malmivyöhykkeiden ympärille, ollen voimakkaammillaan malmion alueella (proksimaalivyöhyke). Muuttumisen intensiteetti vähenee mitä kauemmaksi malmiosta ollaan (intermediäärinen ja distaalivyöhyke). Voimakkainta se on juuri juonien ja malmimuodostumien välittömässä läheisyydessä (Kuva 3).



Kuva 3. Havaintokuva orogeenisen kultaesiintymän muuttumisvyöhykkeistä. Kuva: Jukka-Pekka Ranta

Yleisimmät mineraaliseurueet proksimaalivyöhykkeissä ovat vihreäliuskefasieksen olosuhteissa on kalsiitti, ankeriitti, kvartsi, dolomiitti, serisiitti ja sulfidimineraalit. Kloriitti ja kalsiitti ovat yleisiä mineraaleja distaalivyöhykkeissä. Sulfidimineraaleista pyriitti on yleisin orogeenisissa esiintymissä yhdessä magneetikiisun ja arseenikiisun kanssa. Joissain esiintymissä mineraaliseurueisiin kuuluu olennaisesti telluridimineraalit. Perusmetallisulfidimineraalit (kuparikiisu, sinkkivälke, lyijyhohde jne.) ovat harvassa tai vähäisinä orogeenisissa esiintymissä (Ridley 2016). Näiden mineraalien esiintyminen korostuu nimenomaan epätyypillisissä orogeenisissa esiintymissä.

Juonet orogeenisissa esiintymissä ovat yleisimmin kvartsipitoisia ja sisäiseltä rakenteeltaan ne voivat olla joko rakenteettomia, massiivisesta karkeaan, raitaisia tai kerroksellisia. Karbonaattimineraalit (esimerkiksi kalsiitti tai ankeriitti) ovat myös hyvin yleisiä pienemmissä määrin, sekä erilaiset sulfidimineraalit. Muut juonissa esiintyvät, erityisesti korkean metamorfoosiasteen isäntäkivissä olevissa, mineraalit ovat albiitti, tremoliitti ja diopsidi. Kulta esiintyy suurimmaksi osaksi juonissa tai hyvin muuttuneissa isäntäkivissä. Kulta on yleensä irtokultana (engl. native gold) tai elektrumina (kullan ja hopean metalliseos) kiinni sulfidimineraaleissa. Joissain tapauksissa kulta esiintyy refraktorisena/hajautettuna muun muassa tellurideissa (esim. kalaveriitti AuTe_2) tai esimerkiksi arseenikiisussa (Ridley 2016).

4. Epätyypillinen orogeeninen kulta

Epätyypilliset orogeeniset kultaesiintymät eroavat klassisista orogeenisista kultaesiintymistä niiden sisältämien metallien vuoksi, joita ei esiinny perinteisissä orogeenisissa kultaesiintymissä (esim. Ag, Cu, Co, Ni tai Sb). Näin ollen rikkikiisun, magneetikiisun ja arseenikiisun lisäksi, ne voivat sisältää huomattavia määriä kuparikiisua, kobolttihohdetta, pentlandiittia, gersdorfiittia, sekä antimonihohdetta. (Eilu 2015)

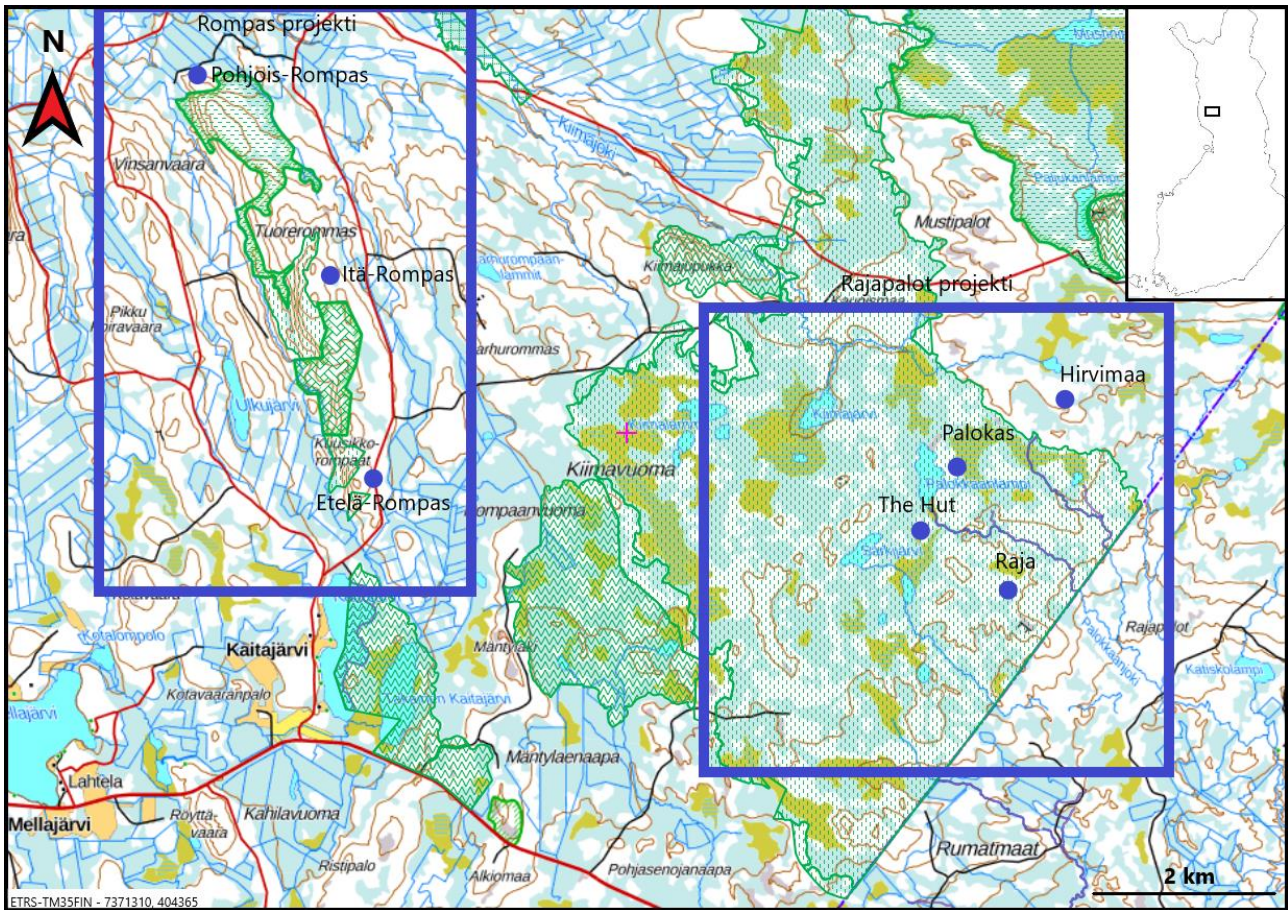
Epätyypillisiä orogeenisia kultaesiintymiä esiintyy samankaltaisissa ympäristöissä, kuin perinteiset orogeeniset kultaesiintymät, mutta erityisesti niitä on löydetty Prekambrisilla kallioperäalueilla (Robb 2005). Goldfarb ym. (2001) mukaan kyseiset esiintymät muodostuisivat erityisesti alueilla, joissa paleoproterotsooinen tektonismi deformerii mantereen sisäistä kerrostuma-allasta. Syntyneissä hydrotermisissä fluideissa on tavallista korkeampi suolaisuuspitoisuus. Korkeamman suolapitoisuuden fluideissa kloridikompleksin (Cl^-) muodostuminen olisi tavallista suuremmassa roolissa hydrotermaalisessa systeemissä. (Goldfarb ym. 2001) Kloridikompleksi toimii ligandina, sekä koville, että pehmeille metalleille. Tämä edesauttaisi perusmetallien liukenemista orogeenisiin fluideihin. (Robb 2005) Tämä voisi selittää epätyypilliset metalliassosisaatiot (Goldfarb ym. 2001).

Suomessa on löydetty useita vastaavanlaisia epätyypillisiä orogeenisia kultaesiintymiä. Yli kaksikymmentä esiintymää on löydetty pelkästään Keski-Lapin vihreäkivivyöhykkeestä. Näillä on kullan ja perusmetallien lisäksi yhteistä kohtalainen fluidien suolaisuus (10–25 % NaCl). Peräpohjan, Kuusamon ja Keski-Lapin alueella esiintymille on tyypillistä myös laajamittainen albiittisoituminen ja karbonaattisoitumista kallioperässä. Nämä kuvaavat orogeniaa edeltäviä tektonisia prosesseja. (Eilu 2015) Albiittisoituminen kertoo natriumin suuresta määrästä, sillä siinä natriumrikas albiitti korvaa kalsiumrikasta anortiittia. Natriumin määrä voisi indikoida myös fluidien korkeampaa suolapitoisuutta ja toimia natriumin lähteenä. (Vanhanen 2001)

5. Esimerkkitapaukset

5.1. Rompas-Rajapalot Au-Co-U

Rompas-Rajapalojen alue sijaitsee Ylitornion kunnan alueella. Geologisesti se kuuluu Peräpohjan liuskealueeseen ja esiintymät sijaitsevat liuske alueen pohjoisosassa (Kuva 4.). Romppaan alueen mineralisaatio löydettiin vuonna 2008 AREVA NC:n toimesta lentogeofysikaalisten radiometristen karttojen avulla. Vuonna 2010, Mawson Resources lunasti alueen AREVA:lta ja on tutkinut sitä siitä lähtien. Vuonna 2012, Romppaan itäpuolelta löydettiin Rajapalojen kullasta ja koboltista rikastunut alue. Kokonaisuudessaan alueen laajuus on noin 10 x 10 km. Rajapalojen alueella on pääasiallisesti kulta-kobolttimineralisaatioita ja Romppaan alueella tavataan kulta-uraaniassosiaatio karbonaatti-kalkkisilikaattijuonissa. (Kuva 4; esim. Ranta et al., 2018)



Kuva 4. Kuvassa alueen kartta. Esiintymien sijainti on arvioitu suunnilleen Mawson resources Oy:n verkkosivujen (Mawson gold Ltd.) tietojen perusteella. Pohjana retkikartan peruskartta ja suojelualueet. (Retkikartta.fi)

5.1.1. Rompas

Rompaksen alueen kallioperässä esiintyy pohjoissuuntaisia harjanteita, jotka koostuvat metabasaltista, ja karbonaatti- ja karbonaatti-albiittikivistä. Au-U mineralisaatio sijaitsee metabasalteissa. Metabasaltit ovat pääsääntöisesti karkeudeltaan hienosta keskikarkeaan ja sisältävät plagioklaasista, kvartsista, amfiboleista ja biotiitista koostuvan mineraaliseurueen (Vanhanen ym. 2015). Au-U esiintyy metabasaltteja leikkaavissa metamorfoituneissa dolomiittikalkkisilikaattijuonissa. Juonien päämineraaleina tavataan dolomiittia, kalsiittia, diopsidia, kvartsia ja aktinoliittia (Vanhanen ym. 2015). Juonet ovat suuntautuneet pohjois-eteläsuuntaisesti ja juonien paksuus vaihtelee 1–30 cm. Juonien deformaatio yhdessä isäntäkiven kanssa viittaa niiden syntyneen ennen deformaatiota. Metamorfoitumisen ja muutosten seurauksena mineraalisaatioon on muodostunut Au-U rikkaita ”taskuja/kapseleita”. Nämä taskut sisältävät useasti myös pyrobitumia (Molnár ym. 2016). Alueella esiintyy myös samankaltaisia juonia metasedimenttien ympäröimänä, mutta nämä eivät ole rikastuneet kullasta tai uraanista (Vanhanen ym. 2015).

Kulta esiintyy Rompaksen esiintymässä suurina rakeina ja näkyvänä kultana uraniniitin halkeamissa. Kullan lisäksi uraniniitin raossa esiintyy pienessä määrin sulfideja, arsenideja ja tellurideja. Juonien ympärillä oleva hydroterminen muuttuminen on tyypillisesti biotiitti- ja albiittirikasta, joka on lähes tuhonnut alkuperäisen magmaattisen rakenteen metabasaltista (Vanhanen ym. 2015).

Rompaksen esiintymän kalkkisirikaatti-uraniittijuonien arvellaan olevan vanhempia kuin 1.8–1.9 miljardia vuotta ja muodostuneet ennen Svekofennian orogeenian aiheuttamaa metamorfoitumista ja deformaatiota. Tähän tulokseen on tultu juonien rakenteellisten ja mineralogisten havaintojen perusteella. Uraniniitin ikämääritysten perusteella, Molnár ym. (2016) esitti, että primaari uraanimineralisaatio muodostui > 1.95 miljardia vuotta sitten. Metamorfoosin aikana, aiemmin syntynyt uraniniitti uudelleen mobilisoitui ja muodosti karkearakeiset uraniniitti ”taskut” kalkkisirikaatti-karbonaattijuoniin. Kultamineralisaatio muodostui noin 1.78 miljardia vuotta sitten, eli huomattavasti myöhemmin kuin pääuraniniittimineralisaatio. Kultaa kuljettavan fluidin reagointi uraniniitin (ja pyrobitumin) kanssa aiheutti kultaa kuljettavien kompleksien destabilisaation, jonka seurauksena kulta saostui yhdessä telluridien ja sulfidien kanssa. (Molnár ym. 2016)

5.1.2. Rajapalot

Rajapalojen Au-Co esiintymät sijaitsevat Rompaksen alueesta noin 8 km itään. Alueen litologia vaihtelee sisältäen kvartsiitteja, albiittirikkaita metasedimenttejä, peliittisiä metasedimenttejä, kalkkisirikaatti-albiittikiviä, kordieriitti-ortoamfibolikiviä, karbonaatti- ja rautasulfidirikkaita liuskeita ja mafisia kiviä. Aluetta peittää glasiogeeninen moreeni, mikä vaikeuttaa kivilajiyksiköiden suhteiden määrittystä toisiinsa nähden (Ranta ym. 2018). Alue sisältää useita kulta-(koboltti)mineralisaatioita vaihdellen paikoitellen U-rikkaista Rompaksen tyyllisistä esiintymistä aina kultaesiintymiin metasomatisoituneissa metasedimenteissa. Yleisesti Rajapalojen alueella kulta ei liity vahvasti uraaniin, vaan esiintyy pirotteena isäntäkivissä (Ranta ym. 2018). Rajapalojen alue voidaan jakaa useaan kohteeseen, joista tämän hetken tutkimukset keskittyvät Palokkaan, Rajan ja Rumajärven esiintymiin (Ranta 2018). Tässä työssä käsitellään lähemmin Palokkaan esiintymää.

Palokkaan kultamineralisaatio löydettiin vuonna 2012 Mawson Resources Ltd:n malminetsinnän tuloksena. Palokkaassa kulta esiintyy yksittäisinä, kohtalaisen isoina rakeina hajautettuna Fe-Mg rikkaassa metasedimenteissä, sekä pienempinä rakeina turmaliinin raoissa kvartsi-turmaliini-sulfidi breksioissa. Esiintymän isäntäkivenä toimii metamorfoitunut kalsium köyhä, Mg-Fe-rikas kivilajiyksikkö, joka sijaitsee albiittisoituneiden kalkkisirikaattikerrosten välissä (Ranta ym. 2018). Esiintymän kultamineralisaation ikä on molybdeniitin Re-Os ikämäärittelyn perusteella noin 1.78 Ga (Molnár ym. 2017). Tämä osoittaa, että mineralisaatio on ajallisesti yhteydessä myöhäisorogeenisiin pegmatiittisiin graniitteihin (Ranta ym. 2015; Ranta ym. 2018). Tätä tukee myös

Ranta ym. (2017) analysoimat turmaliinin boori-isotooppiarvot, jotka ovat samanlaisia kultamineralisaation turmaliinin sekä myöhäisorogeenisten graniittien turmaliinien välillä. Kullan esiintyminen kahdessa eri muodossa (karkea ja rakokulta) viittaa kullan saostumiseen useammassa vaiheessa (Ranta ym. 2018).

5.2. Kuusamon Au-Co-Cu esiintymät

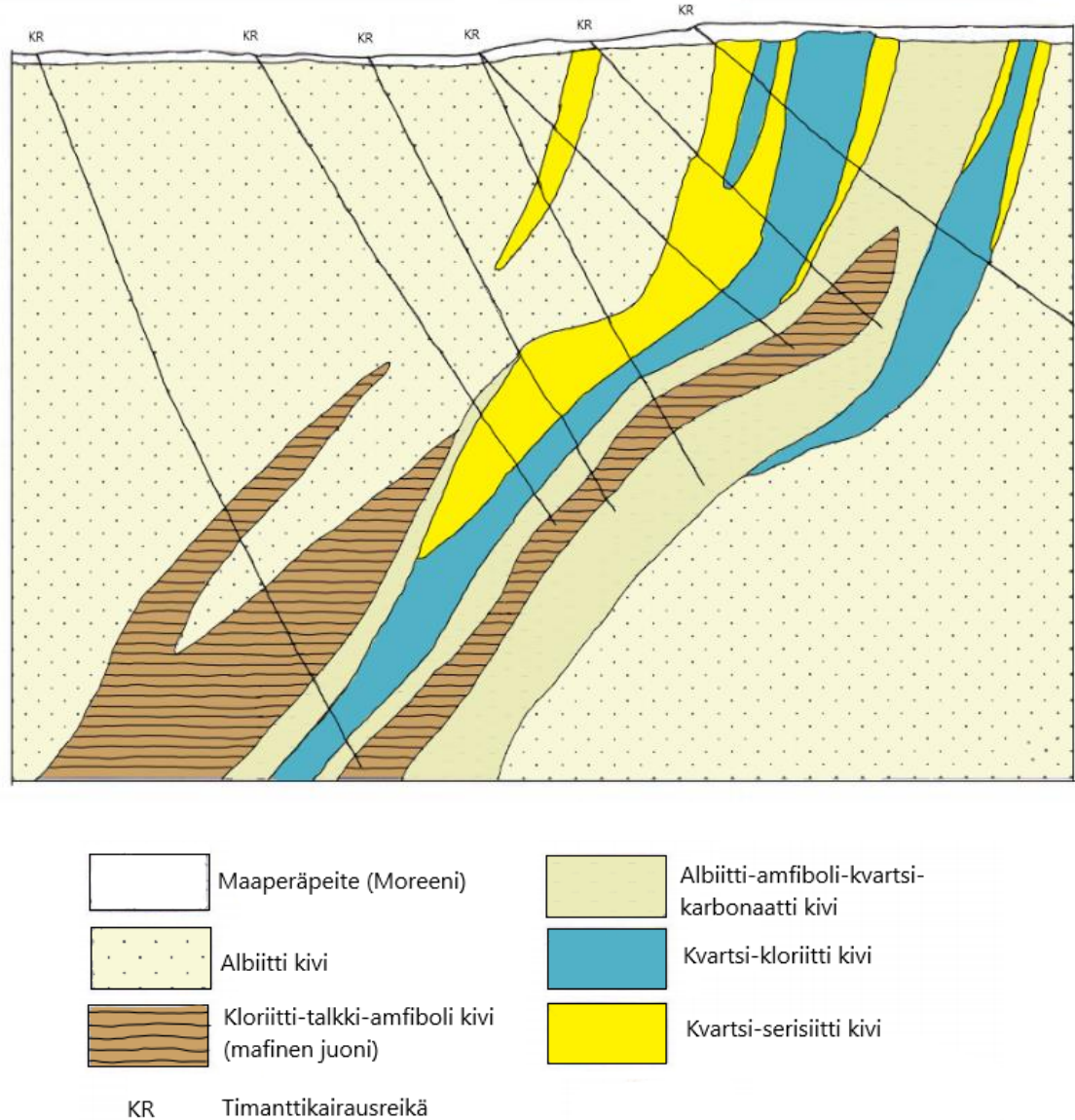
Kuusamon liuskealueella esiintyy useita kultaesiintymiä, joilla on tyypillistä koboltin/uraanin esiintyminen kullan kanssa. Juomasuon Co-Au esiintymä on yksi suurimmista tämän tyyppin esiintymistä Kuusamossa. Noin 1 km päässä sijaitsee toinen, Hangaslammen Au-Co esiintymä. Alueelta on löydetty myös muita vastaavanlaisia esiintymiä, kuten Kouervaara (Co-Cu-Au), Konttiahon (Co-Au-U), Sivakkaharju (Au-U) ja Meurastuksenaho (Co-Cu-Au) (Vanhanen 2001). Esiintymien isäntäkivinä toimii yleisimmin metasedimentit ja mafiset kivet. Ne ovat myös usein rakenteellisesti Käylä-Konttiahon antiformin kontrolloimia. Esiintymiä peittää glasiogeeniset maaperämuodostumat. (Witt ym. 2020)

Esiintymät sijaitsevat paleoproterotsooisessa Kuusamon liuskevyöhykkeessä. Kuusamon liuskevyöhyke rajautuu etelässä ja idässä arkeisiin Karjalan ja Belamorian vyöhykkeisiin. Lännessä ja luoteessa liuskealue rajautuu arkeiseen Pudasjärven vyöhykkeeseen ja proterotsooiseen Keski-Lapin vyöhykkeeseen. (Vanhanen 2001)

Juomasuon esiintymä löydettiin vuonna 1985 lentogeofysikaalisten elektromagneettisen ja magneettisen kartoituksen avulla. Tämän mahdollisti korkeahko sulfidipitoisuus esiintymässä. Esiintymä koostuu päämineralisaatiosta ja muutamasta pienemmästä satelliittiesiintymästä päämineralisaation ympärillä. (Vanhanen 2001)

Juomasuon malmio on rakenteeltaan litistyneitä juonia, jotka kaatuvat jyrkästi (keskimäärin 50°) lounaaseen yleisen vallitsevan rakenteen mukaisesti (Witt ym. 2020). Päämalmio on kooltaan noin 50 x 100 m. Yleisin sulfidimineraali esiintymässä on magneettikiisu. Rikkikiisua esiintyy pääasiallisesti kuutiollisina porfyroblasteina ja pirootteena. Kuparikiisua, molybdeniittiä ja lyijyhohdetta esiintyy vähäisissä määrin esiintymässä. Oksidimineraaleista rutiili, uraniitti ja magnetiitti ovat yleisiä. Hematiitti ja ilmeniitti esiintyy lähinnä mineralisaation ulkopuolella. Kobolttihohde on tärkein Co sisältävä mineraali esiintymässä. Se esiintyy hienorakeisena ja pirootteena. Kobolttipitoinen pentlandiitti on toinen esiintymästä löydettyistä Co sisältävistä mineraaleista. Kulta esiintyy hyvin pieninä rakeina ja sulkeumina rikkikiisussa, magneettikiisussa ja satunnaisesti kobolttihohteessa ja molybdeniitissa. Kulta löytyy myös pieninä rakeina silikaateissa ja uraniitin ja telluridien raoissa. (Vanhanen 2001)

Juomasuon esiintymä sijaitsee serisiitti-kvartsiitti muodostumassa. Suurin osa ympäröivistä kivistä ovat sedimenttistä alkuperää, lukuun ottamatta löydettyä ultramafista kerrosmyötäistä juonta (Kuva 5). Pankka & Vanhanen (1992) jakoivat malmivyöhykkeet kahteen tyyppiin: Co-malmi ja Co-Au-malmi. Co-malmia esiintyy kvartsi-kloriitti kivissä ja Co-Au-malmia kvartsi-serisiitti-kloriitti-kivissä. Yleisesti ottaen koboltti esiintyy laajemmalla alueella kuin kulta.



Kuva 5. Yksinkertaistettu geologinen pystyleikkaus Juomasuon esiintymästä. Kuva muokattu Vanhanen (2001) ja Pankka & Vanhanen (1992) jälkeen.

Esiintymää ympäröivät kivet ovat voimakkaasti albiittisoituneita. Tämä albiittisoitunut vyöhyke jatkuu useiden satojen metrien päähän esiintymästä heiketen mitä kauemmaksi esiintymästä mennään (Vanhanen 2001). Albiittisoitunut vyöhyke on vanhin ja sitä seuraa nuoremmat ja pienemmät Mg-

Fe-silikaatti- ja K-silikaattimuuttumisvyöhykkeet. Albiittisoituneen vyöhykkeen keskusosa koostuu lähinnä albiitista, jossa esiintyy sivumineraaleina kvartsiä, serisiittiä, rutiilia, biotiittiä, karbonaattia, vihreää kiillettä ja turmaliinia. Laitoja kohden kvartsin ja karbonaatin määrä lisääntyy, kunnes kivilaji vaihtuu ensin albiitti-kvartsi-karbonaattikiveksi ja siitä vielä serisiitti-kvartsiitiksi (Pankka & Vanhanen 1992). Albiitit ovat alueella massiivisia, joista on löydetty muutamia säilyneitä rakenteellisia piirteitä. Hivenainetutkimuksen tulokset antavat ymmärtää, että sekä mafista vulkaanista, että sedimenttiperäistä kiveä on albiittisoitunut alueella (Witt ym. 2020).

Fe-Mg-silikaatti muuttumisvyöhykettä kuvaa albiitti-amfiboliittikivet (Pankka & Vanhanen 1992). Vanhanen (2001) kuvaili kiviä albiitti-amfiboliitti-kvartsi-karbonaatti kiviksi, jotka voidaan jakaa kahteen ryhmään (albiitti-amfiboliitti-kvartsi-karbonaatti (AACR) ja kvartsi-serisiitti-kloriitti), huolimatta niiden monimutkaisista sisäisistä koostumusvaihteluista ja päällekkäisyyksistä. Fe-Mg-silikaatti muuttumisvyöhykkeeseen kuuluu AACR kivet. Ne ovat albiittisia kiviä heterogeenisempia mineralogialtaan ja muuttumiseltaan hyvin monimutkaisia. Tämä on aiheuttanut vyöhykkeellistä muistuttavan kerroksellisen rakenteen. Eli AACR kivet koostuvat ”kerroksista” ja yksi kerros kuvaa tietynlaista muuttumista. Näiden ”kerroksien” kokonaisuus luo vyöhykkeellisyyttä muistuttavan kerroksellisen rakenteen. Muuttumisvyöhykkeessä albiitti, kvartsi, karbonaatti ja amfiboliitti ovat hallitsevia mineraaleja. Biotiittiä, kloriittiä ja serisiittiä löytyy vaihtelevasti kerroksien välillä. Yleisimmät sivumineraalit ovat rutiili, apatiitti, turmaliini, pyriitti ja titaniitti. (Vanhanen 2001)

K-silikaattimuuttumisvyöhykettä kuvaavat kvartsi-serisiitti-kloriitti ryhmän kivet. Nämä ovat pääisäntäkivet esiintymän mineralisaatiolle (Pankka & Vanhanen 1992). Voimakas muuttuminen aiheutti albiitin tuhoutumisen ja muodosti serisiittisen ja kloriittisoituneen muuttumisvyöhykkeet, jotka menevät limittäin ilman selvää rajausta. Kvartsin, serisiitin, kloriitin ja malmimineraalien lisäksi esiintyy vaihtelevasti albiittia ja biotiittiä. Sivumineraaleina esiintyy turmaliinia, apatiittia, allaniittia, monatsiittia ja zirkoneita. (Vanhanen 2001)

Vanhanen (2001) esittää Juomasuon esiintymän kobolttirikkaiden vyöhykkeiden muodostuneen ensin. Tämän jälkeen voimakas serisiittiytymisen pyyhki yli ja syrjäytti aiemmin muodostuneet kloriittiutuneet kobolttirikkaat malmivyöhykkeet aiheuttaen erillisen Co-Au rikkaat vyöhykkeet. Hän myös luokitteli esiintymät Fe-oksidi-Cu-Au (IOCG) esiintymiksi, sillä niissä esiintyy useita samankaltaisia piirteitä.

Kultarikkaiden vyöhykkeiden taustalla olisi As-rikas fluidi, joka näkyy kokokivi analyyseissä korkeampana As pitoisuuksina. Korkeat Fe, S ja Co pitoisuudet, verrattaessa tyypilliseen kultaesiintymään, kultavyöhykkeissä voisivat olla peräisin aiemmin muodostuneesta kloriittisista kobolttivyöhykkeistä. As ja Co pitoiset fluidit muodostivat kobolttihohdetta. Kultarikkaat

vyöhykkeet Juomasuossa, sekä Hangaslammella ovat rakenteellisesti ja mineralogisesti samankaltaisia orogeenisiin esiintymiin nähden, joten orogeenisille esiintymille tyypillisiä hydrotermisen fluidin koostumusta pidetään todennäköisimpinä fluidityypinä. Tyypillisiin orogeenisiin esiintyminen nähden, esiintymässä ei kuitenkaan ole havaittu tyypillistä karbonaattiutumista, mikä viittaisi fluidien vähäiseen CO₂ pitoisuuteen (Witt ym. 2020).

5.3. Levijärvi-Loukinen

Levijärvi-Loukinen esiintymä on monimetallinen juonikultaesiintymä, joka sisältää kullan lisäksi myös Cu, Fe, Ni, Au ± Ag ja Co. Se sijaitsee Paleoproterotsooisella Keski-Lapin vihreäkivivyöhykkeellä Kittilän kunnan alueella lähellä Sirkan kylää. Viitteitä esiintymästä on saatu ensimmäistä kertaa 1940–1950 luvulla, jolloin Atri Oy suoritti alueella kallioperäkartoitusta, maaperän magneettista ja elektromagneettista kartoitusta, sekä timanttikairautusta. Varsinaisesti Levijärvi-Loukisen esiintymän löysi GTK vuonna 1993 (Holma & Keinänen 2007). Alueella on tehty malminetsintää ainakin GTK:n toimesta vuosina 1993–2001, jolloin suoritettiin geofysikaalisia mittauksia, vähäistä geokemiallista näytteenottoa, sekä syväkairauksia (Keinänen ym. 2001).

Esiintymä voidaan jakaa neljään pienempään esiintymään: Levijärven Au-Ni, Paaminamaan Cu-Au-Ni, Loukisen Cu-Ni-Au, sekä Tienpään Ni-Cu-Au. Mineralisoituneen alueen koko on n. 5 kilometriä. Levijärven esiintymästä on tehty mineraalivarantoarvio, jonka mukaan kultavaltainen osa sisältää 114 000 tonnia malmia, jonka Au pitoisuus on 0,5 g/t ja Ni pitoisuus 0,45 %. Muista esiintymistä on vain kairauksien yksittäisiä tuloksia, eikä kokonaisvaltaista arviointia ole saatavilla. (Holma & Keinänen 2007)

Tässä työssä kutsutaan alueen esiintymiä vain Levijärvi-Loukinen yhteisnimellä. Esiintymät sijaitsevat Sirkan hirtovyöhykkeellä, joka on WNW suuntainen, jyrkästi etelään kaatuva (60–90 astetta). Useat Keski-Lapin alueella esiintyvät mineralisaatiot seuraavat tätä rakennetta. Se on muodostunut Kittilä ja Savukoski ryhmien rajapinnalle (Keinänen et al. 2001). Alueen deformaatio vaihtelee haura-duktilivvyöhykkeisestä hauraaseen. Esiintymä koostuu kvartsi-karbonaatti-sulfidi juonien verkostosta, sekä niiden ympärillä olevasta muuttumisvyöhykkeestä. Alueen juonet ovat progressiivisesti deformatuneet paikallisen jännityksen toimesta, minkä vuoksi juonien materiaalia on hajautunut myös ympäröivään hirtovyöhykkeeseen. Mineralisaatiossa kullan lisäksi on rikastunut kuparia, rautaa, nikkeliä ja kobolttia, jotka eivät ole tyypillisiä metalleja orogeenisissa kultaesiintymissä. Yleisimmät mineraalit juonissa on magneettikiisu ja kuparikiisu. Myös useita nikkelimineraaleja esiintyy, kuten gersdorfiittia (NiAsS), nikkelpitoista arseenikiisua, nikkelpitoista

kobolttihohdetta ja vähäisenä määrinä pentlandiittia. Kulta esiintyy sulkeumissa ja sulfidien rakojen täytteenä irtokultana. (Holma & Keinänen 2007)

Esiintymää ympäröivät Savukoski ryhmän vulkaanis-sedimenttiset kivet. Tämä ryhmä koostuu pääasiallisesti grafiittisesta fylliitistä, fylliitistä, ja tuffiitista, sekä Sattasvaaran muodostuman komatiiteista (Lepistö & Lahti 2016). Isäntäkivet ovat metamorfoituneita ja mineralisaatio on muodostunut alhaisen-keskiasteisen vihreäliuskefasieksen paine - lämpötilaolosuhteissa (Eilu 2003).

Levijärvi-Loukisen esiintymään kuuluu vahvasti mineralisaation ympärillä tapahtunut mineraalien muuttuminen. Se on vahvana kvartsi-karbonaatti-sulfidi juonien ympärillä ja on tapahtunut useammassa jaksossa. Albiittisoituminen on varhaisin muuttumisen vaihe. Klastisissa sedimenttikivissä muuttumiseen liittyvään mineraaliseurueeseen kuuluvat karbonaatti, kvartsi, serisiitti ja albiitti. Mafisissa kivissä mineralogia koostuu karbonaatti, kvartsi, kloriitti ja biotiitti seurueestan, sekä ultramafisissa esiintyy lisäksi talkkia ja fuksiittia. (Lepistö & Lahti 2016)

Levijärvi-Loukisen esiintymässä on useita orogeenisen kultaesiintymään liittyviä piirteitä, minkä perusteella Holma & Keinänen (2007) luokittelivat sen kuuluvan siihen. Heidän mukaansa esiintymän on muodostunut noin 300–475°C lämpötilassa ja 1.5–3 kbar paineessa. Mineralisaation läheisyys ultramafisten kivien (mahdollinen lähde $\text{Ni} \pm \text{Cu} \pm \text{Co}$), mafisten metavulkaniittien (mahdollinen Fe lähde) ja grafiittipitoisten metasedimenttikivien (mahdollinen lähde $\text{S} \pm \text{As}$ ja Cu/Fe) voisi olla pääsyy havaituille, epätyypillisille piirteille (Holma & Keinänen 2007).

5.4. Saattopora

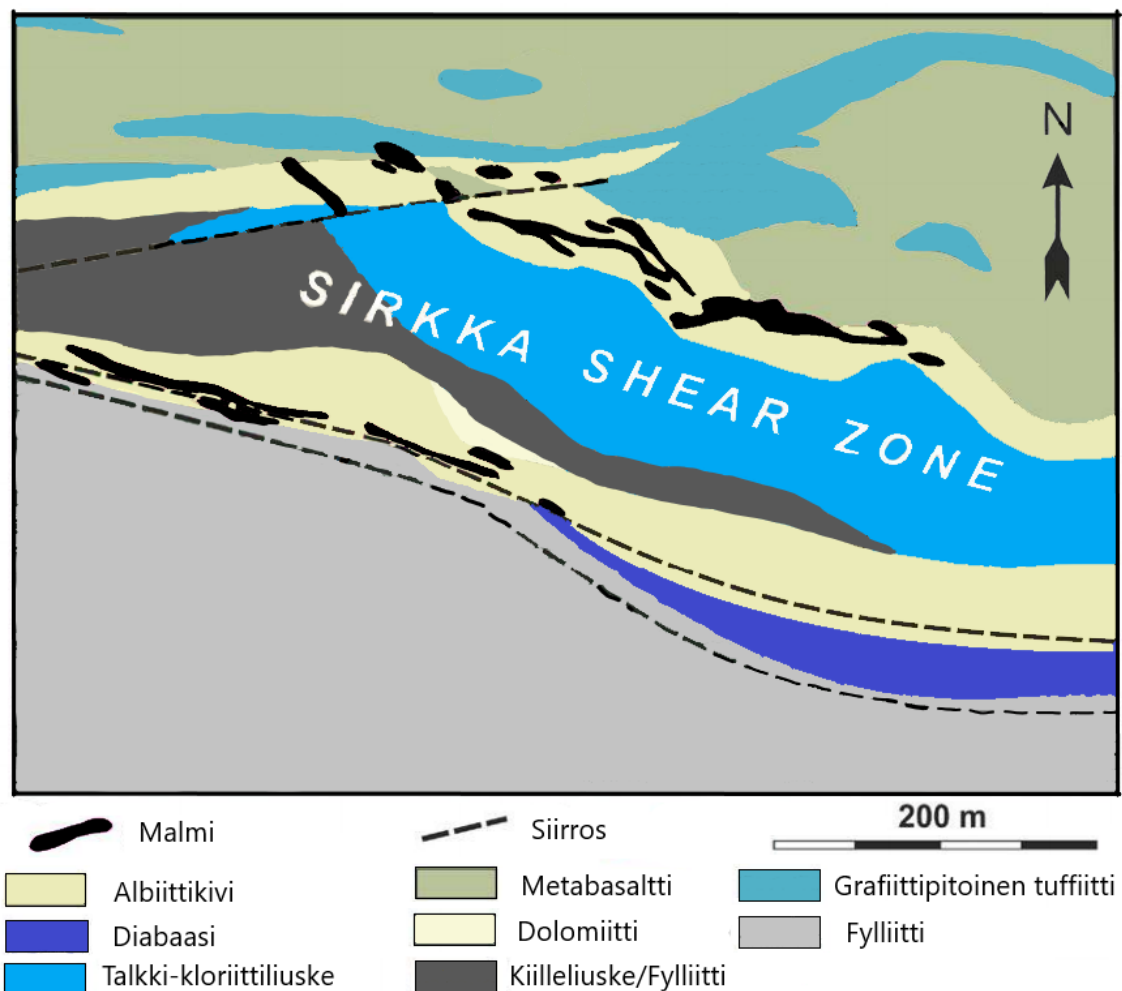
Saattopora on orogeeninen kultaesiintymä epätyypillisen metalliassosiaation (Cu) kanssa. Se sijaitsee Kittilän kunnan alueella Lapissa ja liitetään Pahtavuoman Cu-Zn-U esiintymän kanssa usein toisiinsa. Alueella malminetsintää on harjoitettu 60-luvulta asti, mikä lopulta johti Pahtavuoman esiintymän löytymiseen vuonna 1970, sekä pari vuotta myöhemmin Saattoporan kultaesiintymän löytymiseen. Saattoporan kultaa oli tullut porauksissa vastaan jo aiemmissa etsintävaiheissa, mutta tuolloin kultaa ei systemaattisesti analysoitu näytteistä, jonka vuoksi esiintymä jäi havaitsematta. Myöhemmin kairaustuloksia verrattiin Norjan Bidjovagge Cu-Au esiintymän kanssa ja havaittiin yhtäläisyyksiä, mikä auttoi lopulta löytämään Saattoporan esiintymän. (Korvuo 1997)

Saattoporan kultaesiintymää on louhittu vuosina 1988–95 Outokumpu Mining Ltd. toimesta (Ennen Outokumpu Finnmines Oy). Tuolloin kaivos tuotti 6279 kg kultaa ja 5177 tonnia kuparia (Eilu 2007). Keskimääräinen kultapitoisuuksien arvioitiin kaivauksien alkaessa olevan 3.6 g/t, sekä kuparin pitoisuus 0.28 % arvioidusta 680 000 tonninn malmivarannoista. Varaintoja tosin löydettiin

kaivauksien jatkuessa ja kaivos muuttui avolouhoksesta maanalaiseksi kaivokseksi vuonna 1992. Kokonaispitoisuuksien arvioitiin lopussa olleen 3.29 g/t Au ja 0.28 % Cu (Korvuo 1997). Jäljelle jääneistä malmivarainnoista ei ole varmaa tietoa (Eilu 2007).

Saattoporan esiintymä on paleoproterotsooinen orogeeninen Au-Cu esiintymä (muuta alkuaineita Ag, As, B, Bi, Se, Te, U, W), jonka geologinen ympäristö on Keski-Lapin vihreäkivivyöhyke. Vallitsevat kivet Saattopora-Pahtavuoma alueella on Kittilä ryhmään kuuluvia metavulkaanisia ja sedimenttisiä liuskeita, sekä Kumpu ryhmän karkeita klastisia sedimenttikiviä (Korvuo 1997). Mineralisaatio on syntynyt useammassa vaiheessa noin 1.87–1.78 miljardia vuotta sitten (Molnár ym. 2019).

Esiintymä sijaitsee Sirkan hiertovyöhykkeellä, joka kyseisellä alueella on suuntautunut WNW-SSE (Kuva 6). Esiintymässä on selvästi havaittavissa rakenteellista kontrollia malmimuodostumien suhteen (Korvuo 1997). Siinä on kaksi päämalmimuodostumaa, jotka ovat pitkänomaisesti samansuuntaisesti Sirkan hiertovyöhykkeen kanssa (Kuva 6). Malmimuodostumat myös kaatuvat pohjoisen suuntaisesti (Molnár ym. 2019). Ne ovat paksuudeltaan 1–25 metriä (Korvuo 1997).



Kuva 6. Saattoporan geologinen kartta ja malmien sijainti. Kuva muokattu (Molnár ym. 2019 ja Korvuo 1997 jälkeen)

Saattoporan malmin kantajana on albitiitti (engl. albitite) ja malmimuodostumat ovatkin vahvasti albiittisoituneita. Pohjoista malmia ympäröi Kittilän sviitin thoeliittinen metabasaltti-grafiittinen tuffiitti, sekä Savukoski ryhmään kuuluva metakomatiittinen (talkki-kloriitti-karbonaatti liuske) yksikkö. Eteläisempää malmia ympäröi Savukoski ryhmän kiilleliuskeet ja grafiitti-fylliitti yksiköt (Molnár ym. 2019). Albiittituminen on voimakkainta malmien läheisyydessä, heiketen itäsuuntaisesti, sekä länsisuuntaisesti Pahtavuoman esiintymää kohti (Korvuo 1997).

Saattoporan kaksi itä-länsi suuntaista malmia sisältää useita pienempiä vertikaalisia pohjois-etelä suuntaisia kvartsi-karbonaattijuonia, jotka ovat muodostuneet deformaation yhteydessä. Esiintymän suurimmat kultapitoisuudet, sekä suurin osa irtokullasta on näissä juonissa ja niiden välittömässä läheisyydessä ympäröivissä kivissä. (Eilu 2007) Kvartsi-karbonaattijuonet ovat paksuudeltaan millimetreistä muutamiin metreihin ja ne ovat selvärajaisia ja rakenteeltaan hauraita (Korvuo 1997).

Esiintymän pääsulfidimineraalit ovat magneettikiisu ja rikkikiisu, jossa kulta esiintyy erillisinä rakeina. Keskimääräinen kullan raekoko näissä on 200–250 µm. Kullan hienousluokka on korkea, sisältäen hieman myös hopeaa (Korvuo 1997). Juonissa esiintyy kullan lisäksi sivumineraaleina pentlandiittia, gersdorfiittia, kobolttihohdetta, arseenikiisua ja tellurideja (Molnár ym. 2019).

Molnár ym. (2019) esitti stabiilien isotooppitutkimusten ja fluidisulkeumatutkimuksen perusteella, että Saattoporan fluidien ajatellaan olevan alkujaan peräisin monesta lähteestä yhden ollessa karbonaattimateriaalirikas metasedimenttikivi. Fluidisulkeumatutkimus paljasti, että vesi-karbonaatti-rikkipitoiset (engl. aqueous-carbonic-sulphuric a-c-s) fluidisulkeumat ovat yhteydessä kvartsin rakotäytteissä esiintyviin sulfidirakeisiin. Havainnot tutkimuksessa tukevat, että malmimineraalien saostus alkoi tämän a-c-s-fluidin kiehumisen myötä. Havaittu fluidisulkeumien nestefaasien vaihteleva suolaisuus voi olla peräisin tästä kyseisestä faasien erottumisesta. Havainnot kevyistä hiilivedyistä karbonaattirikkaissa fluidisulkeumissa, johtivat johtopäätökseen, että karbonaattimateriaalirikkaat sedimenttikivet voisivat olla yksi mahdollinen fluidien lähde. Fluidisulkeumatutkimuksessa käytettiin katodi-luminesenssi kuvausta (engl. cathod-luminescence imaging) ja mikrotermometriaa (engl. mikrothermometry) yhdessä Raman mikrospektroskopian kanssa (Molnár et al. 2019).

LÄHDELUETTELO

- Böhlke, J.K., 1982. Orogenic (metamorphic-hosted) gold-quartz veins. U.S. Geological Survey Open-file Report 82-795, 70–76.
- Eilu, P., 2003. Exploration for orogenic gold deposits - Short course – Notes to accompany hand specimen display. Fennoscandian Exploration and Mining 2003, Rovaniemi, Finland.
- Eilu, P., 2007. FINGOLD: Brief descriptions of all drilling-indicated gold occurrences in Finland – the 2007 data. Tutkimusraportti 166, Geologian tutkimuskeskus.
- Eilu, P., 2015. Overview on gold deposits in Finland. In: Maier W.D., O'Brien H., Lahtinen R. (eds.), Mineral Deposits of Finland, Elsevier, Amsterdam, 377–403.
- European Commission, 2020. Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020) – Final Report. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Gaboury, D., 2019. Parameters for the formation of orogenic gold deposits. Applied Earth Science 128 (3), 124–133.
- Goldfarb, R.J. & Groves, D.I., 2015. Orogenic gold: common or evolving fluid and metal sources through time. Lithos 233, 2–26.
- Goldfarb, R.J., Groves, D.I., & Gardoll, S., 2001. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis. Ore Geology Reviews 18, 1–75.
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S.G. & Robert, F., 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. Ore Geology Reviews 13, 7–27.
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Santosh, M., 2016. The conjunction of factors that lead to formation of giant gold provinces and deposits in non-arc settings. Geoscience Frontiers 7, 303–314.
- Holma, M.J. & Keinänen, V.J. 2007. The Levijärvi-Loukinen gold occurrence: An example of orogenic gold mineralisation with atypical metal association. Geological Survey of Finland, Special Paper 44, 163–184.
- Keinänen, V., Ojala, J. & Nykänen, V., 2001. Proterozoic Greenstone-Hosted Loukinen Au-Ni-Cu Prospect. Valtausraportti CM 06/2741 ja 2743/2001/1/10, Geologian tutkimuskeskus, 25 s.
- Kerrick, R. & Hodder, R.W., 1981. Archaean lode gold and base metal deposits: evidence for metal separation into independent hydrothermal systems. Canadian Mining and Metallurgy Bulletin, Special Volume 74, 144–160.
- Korvuo, E., 1997. The Saattopora gold ore and the Pahtavuoma Cu-Zn-U occurrences in the Kittilä region, northern Finland. Geologian tutkimuskeskus, Opas — Geological Survey of Finland, Guide 43, 21–25.
- Lepistö, K. & Lahti, I., 2016. 3D model of the Levijärvi-Loukinen Au-Cu-Ni occurrence and Loukinen resource estimation. Arkistoraportti 8/2016, Geologian Tutkimuskeskus, 23 s.
- Mawson Gold Ltd., Projects, Finland. [Verkkodokumentti]. Saatavilla: <https://mawsongold.com/projects/finland/rompas-rajapalot-overview>. [Viitattu: 9.11.2020]

- Molnár, F., Lahaye, Y., O'Brien, H., Kurhila, M. & Hulkki, H., 2019. The Saattopora orogenic Au-Cu deposit, Central Lapland Greenstone belt, Finland: fluid sources and timing of hydrothermal processes. *Life with Ore Deposits on Earth – 15th SGA Biennial Meeting 2019, Volume 2*, 723-726.
- Molnár, F., O'Brien, H., Stein, H. & Cook, N., 2017. Geochronology of hydrothermal processes leading to the formation of the Au-U mineralization at the Rompas prospect, Peräpohja belt, Northern Finland: Application of paired U-Pb dating of uraninite and Re-Os dating of molybdenite to the identification of multiple hydrothermal events in a metamorphic terrane. *Minerals* 7, 171 s.
- Molnár, F., Oduro, H., Cook, N.D.J., Pohjolainen, E., Takacs, A., O'Brien, H., Pakkanen, L., Johanson, B. & Wirth, R., 2016. Association of gold with uraninite and pyrobitumen in the metavolcanic rock hosted hydrothermal Au-U mineralization at Rompas, Peräpohja Schist Belt, northern Finland. *Mineralium Deposita* 51, 681–702.
- Patison, N.L., 2007. Structural Controls on Gold Mineralisation in the Central Lapland Greenstone Belt. Geological Survey of Finland, Special Paper 44, 107–124.
- Patten, C.G.C., Pitcairn, I.K., Molnár, F., Kolb, J., Beaudoin, G., Guilmette, C. & Peillod, A., 2020. Gold mobilization during metamorphic devolatilization of Archean and Paleoproterozoic metavolcanic rocks. *Geology*, volume 48. Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/G47658.1>
- Phillips, G.N. & Evans, K.A., 2004. Role of CO₂ in the formation of gold deposits. *Nature* 429, 860–863.
- Phillips, G.N. & Powell, R., 2014. A practical classification of gold deposits, with a theoretical basis. *Ore Geology Reviews* v.65, 568-573. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.04.006>
- Puddephatt, R.J., 1978. *The Chemistry of Gold*. Elsevier science Ltd., Amsterdam, 274 s.
- Ranta, J.-P., Lauri, L.S., Hanski, E., Huhma, H., Lahaye, Y., Vanhanen, E., 2015. U-Pb and Sm-Nd isotopic constraints on the evolution of the Paleoproterozoic Peräpohja Belt, northern Finland. *Precambrian Research* 266, 246–259.
- Ranta, J.P., 2018. Geological evolution and gold mineralization in the northern part of the Peräpohja belt, Finland: Evidence from whole-rock and mineral chemistry, and radiogenic and stable isotopes, *Res Terrae*, Ser. A, No. 38, OULU.
- Ranta, J.P., Hanski, E., Cook, N., Lahaye, Y., 2017. Source of boron in the Palokas gold deposit, northern Finland: evidence from boron isotopes and major element composition of tourmaline. *Mineralium Deposita* 52, 733–746.
- Ranta, J.P., Molnár, F., Hanski, E. & Cook, N., 2018. Epigenetic gold occurrence in a Paleoproterozoic meta-evaporitic sequence in the Rompas-Rajapalot Au system, Peräpohja belt, northern Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, Vol. 90, 2018, 69–108.
- Retkikartta.fi, Saatavilla: <https://www.retkikartta.fi/> [Viitattu: 30.11.2020].
- Ridley, J., 2016. *Ore Deposit Geology*. Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Cambridge, UK.
- Robb, L.J., 2005. *Introduction to ore-forming processes*. Blackwell Science Ltd.

Robert, F., Brommecker, R., Bourne, B.T., Dobak, P.J., McEwan, C.J., Rowe, R.R. & Zhou, X., 2007. Models and Exploration Methods for Major Gold Deposit Types. *Ore Deposits and exploration technology paper* 48, 691-711.

Sarapää, O., Lauri, L. S., Ahtola, T., Al-Ani, T., Grönholm, S., Kärkkäinen, N., Lintinen, P., Torppa, A. & Turunen, P. 2015. Discovery potential of hi-tech metals and critical minerals in Finland. Geological Survey of Finland, Report of Investigation 219.

Tieteentermipankki.fi, Orogenia. Saatavilla: <https://tieteentermipankki.fi/wiki/Geologia:orogenia> [Viitattu: 9.11.2020].

Vanhanen, E., 2001. Geology, mineralogy, and geochemistry of the Fe-Co-Au-(U) deposits in the Paleoproterozoic Kuusamo Schist Belt, northeastern Finland. Geological Survey of Finland, Bulletin 399, 229 s.

Vanhanen, E., Cook, N.D.J., Hudson, M.R., Dahlenborg, L., Ranta, J.P., Havela, T., Kinnunen, J., Molnár, F., Prave, A.R. & Oliver, N.H.S., 2015. Rompas prospect, Peräpohja Schist Belt, northern Finland. In: Maier, W.D., O'Brien, H. & Lahtinen, R. (eds.), *Mineral Deposits of Finland*. Elsevier, Amsterdam, 467–484.

Yardley, W.D. & Cleverley, J.S., 2015. The role of metamorphic fluids in the formation of ore deposits. In: Jenkin, G.R.T., Lusty, P.A.J., McDonald, I., Smith, M.P., Boyce, A.J. & Wilkinson, J.J., editors. *Ore deposits in an evolving earth* 393. London: Geological Society Special Publications; 117–134.